

Hormigón de canto rodado patagónico sometido a elevada temperatura

Ortega N.¹, Priano C.¹, Señas L.¹, Maiza P.², Marfil S.³

Universidad Nacional del Sur. Av. Alem 1253. 8000 Bahía Blanca. TE. 0291-4595184. FAX: 0291-4595148. e-mail: nfortega@criba.edu.ar

Palabras claves: hormigón, temperatura, petrografía.

RESUMEN

Se proyectó un hormigón con materiales usados tradicionalmente en la zona de Bahía Blanca, con el propósito de estudiar su comportamiento al ser expuesto a elevada temperatura y enfriado rápidamente.

Se evaluó la resistencia a compresión, tracción, porosidad, absorción capilar y profundidad de carbonatación. Se realizó un estudio petrográfico con estereomicroscopio y microscopía de polarización sobre secciones delgadas para evaluar la composición de los agregados y las características del hormigón, con especial énfasis en la zona de interfase.

Se evidenció un cambio de coloración en los agregados debido a la oxidación del hierro que contienen los minerales. Se observaron fenómenos de vitrificación de algunos componentes de los agregados y abundantes fisuras en los granos del agregado grueso con continuidad en la pasta.

Las propiedades físicas y mecánicas se modificaron con el incremento de la temperatura, en especial la resistencia, debido al debilitamiento de la interfase, incremento de la porosidad y desarrollo de microfisuras.

¹ Docente Departamento de Ingeniería – UNS.

² Docente Dpto. de Geología – UNS. Investigador Principal CONICET.

³ Docente Dpto. de Geología – UNS. Investigador Independiente CIC de la Prov. de Bs. As.

INTRODUCCIÓN

Uno de los factores que afectan la durabilidad de las estructuras es la acción térmica. El deterioro que experimenta el hormigón cuando se lo expone a elevada temperatura, depende de diversos factores: temperatura máxima alcanzada, tiempo de exposición, tipo de enfriamiento, composición de la matriz, tipo de agregado. El comportamiento de estos últimos es muy importante debido a que ocupan el mayor volumen dentro de la masa de hormigón, y su coeficiente de dilatación térmica varía de acuerdo a su composición mineralógica, aumentando con el contenido de sílice. Los agregados cuarcíticos presentan un coeficiente (12 microdeformaciones por grado centígrado) mucho mayor que los calcáreos (5 microdeformaciones por grado centígrado) (1).

El hormigón en estado endurecido, expuesto a elevada temperatura, sufre cambios físicos y químicos, en muchos casos irreversibles. Los diferentes coeficientes de dilatación térmica que tienen los agregados, respecto a la pasta de cemento, generan microfisuras internas y un debilitamiento en la zona de interfase agregado-mortero. Por otro lado, se producen reacciones y transformaciones químicas en todos los componentes del hormigón. La mayoría de los agregados son estables por debajo de 500 °C, mientras que la transformación alotrópica del cuarzo α a cuarzo β ocurre progresivamente entre 500 y 600 °C y es acompañada por una significativa expansión del orden de 1,2%. Los agregados calcáreos experimentan una decarbonatación entre los 600 y 900 °C y los basaltos, en general, no muestran cambios de fase por debajo de los 800 °C (2). Todas las transformaciones de los agregados se manifiestan por un cambio en su coloración a medida que aumenta el tiempo de exposición. Por encima de los 300 °C el color gris tradicional del hormigón torna a un rosado, como consecuencia de la presencia de hierro en la composición mineralógica de los agregados (3). Como este cambio es permanente e irreversible, se puede estimar la temperatura máxima alcanzada por el hormigón, a posteriori de un incendio en una determinada estructura (4).

Los primeros cambios en la pasta de cemento se producen con la evaporación del agua capilar, para temperaturas superiores a 100 °C, luego comienza la deshidratación del silicato de calcio hidratado (aproximadamente a 180 °C), la descomposición del hidróxido de calcio (500 °C) y finalmente, la del silicato de calcio hidratado (alrededor de 700 °C) (5). La destrucción de los productos de hidratación con un aumento en la porosidad de la pasta de cemento, la alteración de los agregados, las deformaciones diferenciales, el desarrollo de microfisuras y el debilitamiento de la zona de interfase, pueden ser evidenciados y evaluados mediante microscopía óptica. Estudios sobre cortes delgados de hormigones dañados por alta temperatura, pueden ser aplicados para determinar la historia térmica y establecer el deterioro sufrido por una estructura, luego de un incendio. Algunos autores correlacionan la naturaleza, extensión y hasta una cuantificación del cuadro de fisuramiento con las máximas temperaturas alcanzadas en elementos estructurales de hormigón atacado por el fuego (6). De esta manera, el estudio microscópico no solo permitiría hacer una estimación de la máxima temperatura alcanzada, sino también de la profundidad del daño sufrido por el hormigón medida desde la superficie atacada, y que deberá ser removida en los posibles trabajos de reparación.

Los cambios físicos y químicos que experimenta el hormigón expuesto a alta temperatura, afectan directamente su resistencia mecánica. Existe una gran variabilidad entre los resultados referidos por diversos autores respecto a las disminuciones en la resistencia a la compresión. En general, se han observado disminuciones menores al 25%, para temperaturas entre 200 y 250 °C, y por encima de los 300 °C el decrecimiento es más intenso (7), llegando a reducciones del orden del 40%. A los 550 °C esta reducción alcanza valores entre 55% y 70% (3). Para temperaturas mayores a 700 °C se verifica una drástica caída en la resistencia residual, tornándose friable el hormigón a partir de los 900 °C. Este proceso puede agravarse, en función del tipo de enfriamiento al que haya estado expuesta la estructura. En este trabajo se analiza el estado del hormigón ante un enfriamiento acelerado que se produce en el apagado de un incendio, donde el hormigón que se encuentra a una elevada temperatura se lo rocía con agua a una temperatura mucho menor. Este cambio brusco genera un shock térmico, con la consecuente aparición de microfisuras en la masa del hormigón, que afectan a su estructura interna.

METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

En esta investigación se proyectaron tres hormigones de diferentes relaciones agua/cemento: 0,45; 0,50 y 0,56; con el propósito de estudiar su comportamiento al ser expuesto a elevadas temperaturas y enfriado bruscamente. Las características se detallan en la Tabla 1.

Tabla 1: Características de los materiales que componen los hormigones.

Mezcla N°	Kg de material / m ³ de hormigón		
	1	2	3
Relación agua/cemento	0,45	0,50	0,56
Árido fino (Arena natural)	853	878	896
Árido grueso (Canto rodado, Tamaño Máx. Nominal: 25 mm)	1050	1050	1050
Aditivo Plastificante (% referido al peso de cemento)	0,35	0,35	0,35
Asentamiento (cm)	8	9	9

En la elaboración de los hormigones se usó cemento portland normal, arena natural y canto rodado, debido a que es el material más usado en el sur de Argentina. Se encontraron pocos antecedentes internacionales de investigaciones de hormigones expuestos a alta temperatura, elaborados con este agregado grueso.

Se moldearon aproximadamente 80 probetas cilíndricas normalizadas de 15x30 cm. El curado se hizo en el laboratorio, hasta la realización de los ensayos que se efectuaron entre 45 y 90 días después de elaboradas.

Las probetas se separaron en grupos iguales, que fueron expuestas durante un período de 1 hora, a 250 °C, 500 °C y 750 °C de temperatura. Para el tratamiento térmico se empleó un horno eléctrico con control automático de temperatura, revestido con material refractario y aislante, y con una ventilación en su parte superior para permitir la eliminación de los gases. Con el fin de simular la situación que se presenta en el apagado de un incendio, donde se produce un enfriamiento brusco del hormigón sobrecalentado, se enfriaron las probetas mediante un rociado de 200 ml de agua. Otro grupo de probetas no fue sometido a ningún tratamiento, para comparar su desempeño como muestras de referencia o patrón.

Originalmente, se proyectó un tiempo de exposición a alta temperatura de 90 minutos, pero se redujo a 60 minutos, ya que las probetas de mayor relación agua/cemento expuestas a 750 °C, se degradaban en el horno, lo que impedía la realización de cualquier tipo de ensayo. Esto se debe a la gran pérdida de resistencia que sufre el hormigón a esta temperatura. En otras investigaciones (8) se realizaron exposiciones más prolongadas (24 horas), simulando las acciones térmicas que se generan en procesos industriales y no las consecuencias que puede originar un incendio cuya duración es más limitada.

Para la caracterización de los hormigones, se realizaron ensayos de: resistencia a compresión (IRAM 1546)(9), tracción simple por compresión diametral (IRAM 1658)(10), determinación de capacidad y velocidad de succión capilar (IRAM 1871) (11), porosidad (ASTM C642) (12) y profundidad de carbonatación.

Se realizó un estudio petrográfico con estereomicroscopio y microscopía de polarización sobre secciones delgadas. Las probetas sometidas a 750 °C se impregnaron en resina para evitar la desagregación al preparar los cortes. Se evaluó la composición de los agregados y las características del hormigón, con especial énfasis en la zona de interfase agregado-mortero. Se utilizó un estereomicroscopio y microscopio de polarización petro-calcográfico Olympus BH-2 trinocular, con cámara de video y tratamiento digital de imágenes.

RESULTADOS

Se hizo una inspección visual de las probetas, después de ser extraídas del horno, y se observaron cambios en el color superficial de las mismas. Las expuestas a 250 °C, tornaron a color rosado pálido, las de 500 °C color gris y las de 750 °C, color gris más claro. Se evidenció un mayor estado de fisuración a medida que aumentó la temperatura máxima de exposición y la razón agua/cemento. Para todas las dosificaciones, el cuadro de fisuración que presentaron las muestras al ser extraídas del horno, se incrementó cuando se rociaron con agua a 20 °C.

Los resultados de resistencia a compresión y tracción figuran en la Tabla 2. La forma de rotura a compresión de las probetas patrón y las sometidas a 250 °C, fue cónica. Las expuestas a temperaturas mayores, presentaron un plano de fractura casi horizontal. Este comportamiento anormal, evidentemente se debió a la influencia de las fisuras que presentan estos hormigones, después de ser

expuestos a un sobrecalentamiento. Los resultados de capacidad y velocidad de succión capilar se muestran en la Tabla 3 y los de porosidad y profundidad de carbonatación en la Tabla 4.

Tabla 2: Resistencia a compresión y tracción indirecta.

	f'_c (MPa)				f'_t (MPa)			
	Patrón	250 °C	500 °C	750 °C	Patrón	250 °C	500 °C	750 °C
a/c= 0,45	39,0	32,2	22,7	14,5	3,2	2,3	1,4	0,9
a/c= 0,50	30,1	24,6	19,0	9,1	3,0	1,9	1,3	0,7
a/c= 0,56	24,5	20,8	17,7	7,2	2,2	1,5	0,9	0,5

Tabla 3: Capacidad y velocidad de succión capilar.

	C (g/m ²)				S (g/m ² seg ^{1/2})			
	Patrón	250 °C	500 °C	750 °C	Patrón	250 °C	500 °C	750 °C
a/c= 0,45	4411	2867	5093	5340	10,3	7,7	18,2	21,9
a/c= 0,50	4523	3647	5120	5376	11,1	8,0	20,0	24,4
a/c= 0,56	4507	3941	5098	5328	11,2	8,1	21,9	25,4

Tabla 4: Porosidad y profundidad de carbonatación.

	P (%)				d (mm)			
	Patrón	250 °C	500 °C	750 °C	Patrón	250 °C	500 °C	750 °C
a/c= 0,45	8,7	8,8	11,4	12,5	4	12	18	22
a/c= 0,50	9,2	10,3	13,5	13,6	4	13	19	24
a/c= 0,56	9,1	10,1	13,2	13,8	5	13	20	25

En los resultados de absorción capilar, se observó una disminución en los valores de capacidad y velocidad de succión capilar para las probetas sometidas a 250 °C, respecto a las muestras patrón, y un aumento significativo en dichos valores para los dos rangos de temperatura restantes. Este hecho está relacionado con el progresivo aumento de la carbonatación del hormigón, a medida que las temperaturas de exposición aumentan. Para 250 °C, el cuadro de fisuración aún no es significativo, la capa superficial del hormigón experimentó una modificación en su estructura de poros debido a la carbonatación, dificultando el ingreso de agua por los capilares. Para temperaturas superiores, el proceso de deterioro interno es determinante, y se elevan los valores de absorción capilar.

Estudio petrográfico

El agregado grueso está constituido por un canto rodado polimíctico en cuya composición predominan ampliamente las rocas volcánicas. El agregado fino es una arena natural cuarzosa con cantidades subordinadas de feldespato y rocas cuarcíticas. Además se identificó escasa calcedonia, valvas carbonáticas y trizas de vidrio volcánico.

Observaciones con estereomicroscopio

El hormigón de la muestra patrón presenta buena compacidad, los contactos agregado – mortero son netos, no se observan bordes de reacción ni microfisuras. Los clastos se presentan límpidos y las cavidades de aire accidental están vacías. En la figura 2a se muestra la composición del agregado y el estado del mortero. Se ven los clastos del agregado grueso y fino límpidos y las cavidades de aire accidental vacías.

Se analizó la zona periférica y central de la probeta calentada hasta 250 °C. No se observaron grandes diferencias en las características del hormigón respecto al patrón, aunque las partículas del agregado grueso se separan fácilmente del mortero. No hay variaciones entre la zona periférica y el núcleo de la probeta.

A los 500 °C se manifiesta un cambio de coloración en los agregados debido a la oxidación del hierro que contienen los minerales. La separación de los granos es más notoria que a los 250 °C y también afecta a las partículas del agregado fino. El proceso se desarrolla con mayor intensidad en la periferia que en la zona central del testigo. En la figura 2b se muestra un sector del hormigón donde los clastos del agregado grueso aparecen claramente separados del mortero.

A 750 °C el cambio de color en las partículas del agregado es mayor, se observan fenómenos de vitrificación de algunos componentes de los agregados. Es abundante el desarrollo de fisuras en los granos del agregado grueso, en algunos casos con continuidad en la pasta. La separación con el mortero es mayor y el fenómeno afecta hasta la zona central del testigo. En la figura 2c se observan partículas del agregado color rojizo separadas del mortero.

Microscopía de polarización

La figura 2d corresponde a la probeta patrón. Se muestra una partícula de agregado grueso (roca volcánica) y el agregado fino en cuya composición predomina el cuarzo. Los contactos agregado-mortero son netos. No hay fisuras ni bordes de reacción. A 250°C se observa una leve separación de las partículas del canto rodado con el mortero (Figura 1e). En la probeta sometida a 500 °C es posible observar la coloración rojiza de las partículas debido a la oxidación del hierro y los granos del agregado separadas del mortero aún en la zona central.

A 750°C la oxidación de los minerales que contienen hierro es mucho más notoria y más marcada la separación de los clastos con el mortero. Esta separación también afecta a los clastos del agregado fino. El mortero se presenta fisurado, al igual que algunas partículas del agregado grueso. El fenómeno afecta toda la probeta (desde la zona externa al centro). La figura 2f corresponde a un sector de la zona externa.

CONCLUSIONES

- En todos los tipos de hormigón estudiados, las propiedades físicas y mecánicas se vieron modificadas con el incremento de la temperatura.

- La resistencia a compresión de las muestras calentadas hasta 250 °C sufrió una leve disminución. La pérdida aumentó a medida que la temperatura de exposición fue mayor.
- Los resultados de resistencia a tracción mostraron mayor pérdida que los de resistencia a compresión.
- En los resultados de absorción capilar, se observó el mismo comportamiento para las tres relaciones agua/cemento estudiadas: una disminución en los valores de capacidad y velocidad de succión capilar para las probetas sometidas a 250 °C, respecto a las muestras patrón, y un aumento significativo en dichos valores para los dos rangos de temperatura restantes.
- Se observó que las partículas del agregado grueso se separan del mortero a partir de los 250 °C. En las probetas sometidas a 500 °C se manifestó un cambio de coloración en los agregados debido a la oxidación del hierro que contienen los minerales. Estos fenómenos no se manifestaron en el núcleo de la probeta. A 750 °C el cambio de color en las partículas del agregado fue mayor, y se observaron fenómenos de vitrificación de algunos componentes de los agregados. Se desarrollaron abundantes fisuras en los granos del agregado grueso y fino, en algunos casos con continuidad en la pasta, afectando también a la zona central de la probeta.
- Las modificaciones de las propiedades físicas y mecánicas se debieron al debilitamiento en la zona de interfase y desarrollo de microfisuras generadas en el proceso de calentamiento y enfriamiento brusco.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Departamento de Ingeniería, Departamento de Geología y a la SECyT de la Universidad Nacional del Sur, a la CIC y al CONICET por el apoyo brindado para el desarrollo de estas investigaciones y el Sr. Rodolfo Salomón por la colaboración en la compaginación de las fotomicrografías.

REFERENCIAS

- (1) Charreau G., Luna F. "Efecto del fuego sobre los hormigones. Alteraciones sufridas por los agregados". Terceras Jornadas de Desarrollo e Innovación. Instituto Nacional de Tecnología Industrial INTI-CECON. (2000)
- (2) Bazant Z., Kaplan, M. "Concrete at High Temperatures. Material properties and mathematical models". Concrete Design & Construction Series, Longman, (1996), p.412.
- (3) Guise S. "Petrographic and color analysis for assessment of fire damaged concrete". Jany L, et al., editor. Proceedings of the 19th International Conference on Cement Microscopy. (1999), pp 365–372.
- (4) Klaric, M. "Fisuración y ataques físicos al hormigón". Durabilidad del hormigón estructural. Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón, AATH. (2001), pp 47-95.
- (5) Di Maio A., Giaccio G., Villa I., Zerbino R. "Propiedades residuales de hormigones preparados con diferentes agregados expuestos a elevadas temperaturas". 14º Reunión Técnica de la Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón, AATH, Olavarría. (2001), pp 205-212.
- (6) Georgali B., Tsakiridis P. "Microstructure of fire-damage concrete. A case study". Cement and Concrete Composites. Vol. 27, Issue 2, (2005), pp 255-259.
- (7) Barragán B., Di Maio A., Giaccio G., Traversa L., Zerbino R. "Efecto de las altas temperaturas sobre las propiedades fisicomecánicas del hormigón". Ciencia y Tecnología del Hormigón, LEMIT, 5, (1997), pp 51-64.
- (8) Giaccio G., Tobes J., Torrijos M., Zerbino R. "Comportamiento mecánico de hormigones dañados por temperatura", Proceeding VIII Congreso Latinoamericano de Patología de la Construcción CONPAT 2005, Cap. II, (2005), pp 17-24.

- (9) Instituto Argentino de Racionalización de Materiales IRAM 1546. "Hormigón de cemento portland . Método de ensayo de compresión", (1992).
- (10) Instituto Argentino de Racionalización de Materiales IRAM 1658. "Hormigón. Método de ensayo de tracción simple por compresión diametral", (1995).
- (11) Instituto Argentino de Racionalización de Materiales IRAM 1871. "Hormigón. Método de ensayo determinación de la capacidad y velocidad de succión capilar", (2004).
- (12) ASTM C642-97: "Standard Test Method for Density, Absorption and Voids in Hardened Concrete", (1997).

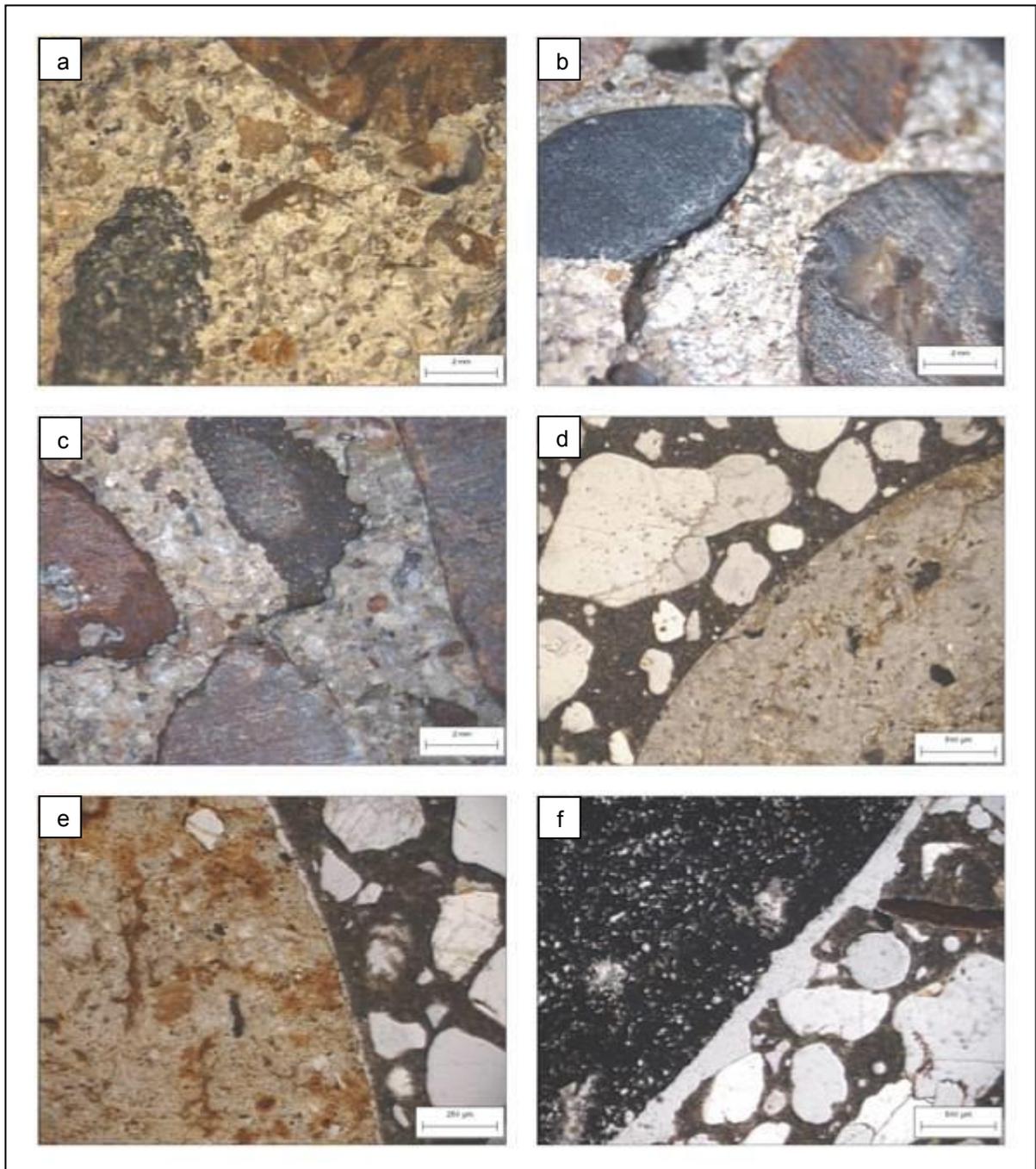


Figura 1: a. Probeta patrón vista con estereomicroscopio. b. Partículas de agregado separadas del mortero (500 °C). c. Cambio de coloración en los granos (750 °C). d. Probeta patrón vista con microscopio de polarización con luz paralela. e. Partícula del agregado grueso con cambio de coloración y separada levemente del mortero (500 °C). f. Similar al anterior pero con un proceso más marcado (750 °C).